اتصال غیرمشابه فلز/پلیمر با روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای*

مهرداد محمودی[۱]　　بهروز بیدختی[۲]　　سمانه صاحبیان سقی[۳]

چکیده

در اتصال ورق‌های آلومینیم و پلی‌اتیلن با روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای، عوامل مختلفی بر استحکام اتصالات تأثیرگذار است که در این پژوهش، اثر شرایط سطحی و زمان ماندگاری ابزار بررسی شد. نتایج نشان‌دهنده افزایش نیروی شکست کشش برشی با طولانی‌شدن زمان ماندگاری ابزار بود که این امر نا شی از گرمای ا صطکاکی بی‌شتر، حجم بی‌شتر مذاب پلی‌اتیلن و درنتیجه افزایش سطح چ سبندگی آلومینیم با مذاب پلیمر ا ست. ا ستفاده از سنبه‌ای که خراش‌های بی شتر با اندازه‌های کوچک‌تر به صورت نقطه‌ای ایجاد کرد، ا ستحکام را به میزان بی شتری افزایش داد، به‌گونه‌ای که بیشترین نیروی برشی اتصالات در حدود N ۷۸۵ به‌دست آمد. همچنین با استفاده از مطالعات ماکروسکوپی و میکروسکوپی، مشخص شد که مکانیزم‌های اصلی اتصال‌دهی ایجاد قفل مکانیکی بین ورق‌ها با ابزار و سنبه‌ها و نیز چسبندگی مذاب پلی‌اتیلن به سطح آلومینیم است.

واژه‌های کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، آلومینیم، پلی‌اتیلن، اتصال.

Dissimilar Joining of Metal/Polymer Using Friction Stir Spot Welding Method

M. Mahmoudi　　B. Beidokhti　　S. Sahebian Saghi

Abstract

In the joining of aluminum and polyethylene sheets with friction stir spot welding method, various factors affect the strength of joints. In this study, the effect of surface conditions and the dwell time of tool have been investigated. The results indicated the increased shear tension load with the prolonged dwell time due to the higher frictional heating, more molten polyethylene formation and an increased adhesion area. The use of mandrill that created more scratches with smaller dimensions was more effective to increase the strength. The highest shear tension load of joints was 785 N. Macroscopic and microscopic studies revealed that the mechanical interlocking and adhesion of molten polyethylene on the aluminum surface were the main joining mechanisms.

Key Words Friction stir welding, Aluminum, Polyethylene, Joining.

---

* تاریخ دریافت مقاله۹۷/۶/۱۱ و تاریخ پذیرش آن ۹۹/۲/۲۲ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) نویسندهٔ مسئول، دانشیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۳) استادیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

Email: beidokhti@um.ac.ir

DOI: 10.22067/jmme.2020.39263

مقدمه

با وجود استفاده گسترده از روش‌های سنتی مانند اتصال با چسب و اتصال مکانیکی برای اتصال «نقطه‌ای» فلز به پلیمر، این روش‌ها دارای نقاط ضعفی هستند. اتصال مکانیکی باعث افزایش وزن و ایجاد نقاط تمرکز تنش در سازه می‌شود، هرچند به‌تازگی گزارش شده است که اتصالات هیبریدی می‌توانند استحکام مناسبی نشان دهند [1]. نیاز به آماده‌سازی سطح و زمان طولانی ایجاد اتصال نیز از جمله معایب اتصال چسبی است [4-2]. درنتیجه، در سال‌های گذشته روش‌های جدیدی برای اتصال نقطه‌ای پلیمرها به آلیاژهای فلزی توسعه یافته‌اند. یکی از این روش‌ها، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای (FSSW) است که به‌صورت‌های مختلفی از آن استفاده می‌کنند [7-5].

گوشه‌گیر و همکارانش [4]، از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای با پرکردن مجدد (FSpJ) برای اتصال آلومینیم AA2024 به پلی‌فنیلن سولفید تقویت‌شده با 50درصد حجمی فیبر کربن (PPS-CF) استفاده کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش عمق نفوذ ابزار در محل اتصال، نیروی برشی لازم برای شکست و مقدار جابه‌جایی تا شکست به‌دلیل افزایش سطح اتصال در فصل مشترک، افزایش می‌یابد. استیوس و همکارانش [8]، آلیاژ آلومینیم AA6181-T4 و کامپوزیت زمینهٔ پلی‌فنیلن سولفید تقویت‌شده با الیاف کربن (CF-PPS) را از طریق فرایند FSpJ به یکدیگر متصل کردند. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش آن‌ها نشان داد که سرعت چرخشی ابزار بیشترین تأثیر را بر نیروی شکست جوش‌ها دارد. علاوه‌براین، افزایش استحکام با افزایش سطح اتصال بین آلومینیم و پلیمر و همچنین تشکیل قفل مکانیکی ماکروسکوپی در فصل مشترک ورق‌های پایه ارتباط داده شد. کرمی پابندی و همکارانش [9]، از یک فرایند جدید با عنوان جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای با سوراخ رزوه‌دار برای اتصال ورق‌های آلومینیم و پلی‌پروپیلن تقویت‌شده با الیاف کوتاه کربن (PP-SCF) استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان‌دهندهٔ افزایش استحکام و انرژی شکست اتصال با افزایش سرعت چرخشی ابزار، به‌دلیل کاهش سطح ذوب‌نشده در قسمت میانی سوراخ و افزایش سطح تحمل‌کنندهٔ نیروست. آن‌ها همچنین مکانیزم‌های اصلی اتصال را ایجاد قفل مکانیکی بین پلیمر منجمدشده و رزوه‌های موجود در سوراخ و نیز تشکیل لایهٔ واکنشی در بین آن‌ها معرفی کردند.

بالاکریشنان و همکارانش [10]، با استفاده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای (FSSW)، ورق‌های آلیاژ آلومینیم و نایلون را به یکدیگر متصل کردند. آن‌ها با مقایسهٔ اتصالات ایجادشدهٔ این روش و اتصالات ایجادشده از طریق چسب، برتری روش FSSW را اثبات کردند. آن‌ها مکانیزم اتصال را چسبندگی مذاب نایلون به سطح زیرین آلومینیم و همچنین تشکیل قفل مکانیکی بین ورق‌ها به‌دلیل تغییر شکل ایجادشده بر روی آلومینیم به‌وسیله ابزار عنوان کردند. یوسف و همکارانش [11]، تأثیر عمق و نرخ فروروی را بر اتصالات آلیاژ آلومینیم به پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با کاهش نرخ فروروی و افزایش عمق فروروی، در منطقهٔ تحت‌تأثیر حرارت بزرگ‌تری ایجاد شد و در اطراف منطقهٔ تماس ابزار حباب‌های کمتر با اندازه‌های کوچک‌تر شکل گرفت.

در این پژوهش، از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای (FSSW)، برای ایجاد اتصال بین ورق‌های آلومینیم و پلی‌اتیلن دانسیتهٔ بالا (HDPE) بهره گرفته شد و بعد از ایجاد اتصال بین ورق‌ها، مکانیزم‌های اتصال و همچنین تأثیر شرایط سطحی و زمان ماندگاری ابزار بر رفتار مکانیکی اتصال مطالعه شد.

روش پژوهش

در این پژوهش از ورق‌های آلومینیم ۱۱۲۰ و پلی‌اتیلن دانسیتهٔ بالا (HDPE) به‌ترتیب به‌عنوان بخش فلزی و پلیمری اتصال با ضخامت‌های ۲mm استفاده شد. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم در جدول ۱ آمده است. نتایج کوانتومتری با آلیاژ آلومینیم ۱۱۲۰ هم‌خوانی دارد. مشخصات پلی‌اتیلن دانسیتهٔ

بالا نیز در جدول ۲ شرح داده شده است. برای انجام جوشکاری، ورق‌های آلومینیم و پلی‌اتیلن در اندازه‌های ۱۰۰×۵۰mm با استفاده از گیوتین برش داده شدند.

برای بررسی اثر شرایط سطحی بر استحکام کشش برشی نمونه‌های جوش‌داده‌شده، با استفاده از ۲سنبه با شکل‌های مختلف به قطر ۱۸mm خراش‌هایی با عمق متوسط ۰/۲mm روی سطح آلومینیم با هدف افزایش زبری سطح ایجاد شد. در ادامه قبل از انجام جوشکاری، سطح آلومینیم با استفاده از سنباده تمیز شد. سپس ورق آلومینیم به اندازهٔ ۵۰mm روی ورق پلی‌اتیلن گذاشته شد و فرایند جوشکاری در مدت‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ثانیه انجام شد. در این پژوهش، دیگر پارامترهای فرایند از قبیل سرعت چرخشی ابزار ۲۵۰۰rpm، نرخ فروروی ابزار ۱۰۰mm/min و عمق فروروی ابزار ۳/۲mm ثابت در نظر گرفته شدند. لازم به ذکر است از ابزاری به‌شکل مخروطی با مشخصات قطر شانه ۱۵mm، قطرهای ته پین ٤mm و نوک آن ۲mm، ارتفاع پین ۳/۲mm و زاویهٔ تقعر ابزار حدود 3° استفاده شد. شرایط جوشکاری در جدول ۳ خلاصه شده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم ۱۱۲۰ استفاده‌شده در این پژوهش (برحسب درصد وزنی)

Al	Fe	Cu	Mg	Mn	Cr	Zn	Ni	Ti	Tb
۹۹/۲۲۰	۰/۵۳۱	۰/۰٤۰	۰/۰۱۹	۰/۰۰۸	۰/۰۰۵	۰/۰۰۷	۰/۰۰۹	۰/۰۲۷	۰/۰۰۵
Si	Ag	Ca	Co	Ga	Sb	B	Bi	V	-----
۰/۰۹۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰٦	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	۰/۰۰٤	۰/۰۱٦	----

جدول ۲ مشخصات پلی‌اتیلن دانسیتهٔ بالا (HDPE)

دانسیته (gr/cm^3)	هدایت حرارتی ((W/(m.K))	ظرفیت گرمایی ویژه ((J/(gr.K))
۰/۹٤ تا ۰/۹٦	۰/۳۳ تا ۰/۵۳	۱/۸ تا ۲/۷
ضریب انبساط حرارتی خطی(10^{-6}/K)	مدول یانگ (MPa)	دمای تجزیهٔ حرارتی (°C)
۲۰۰ تا ۲۵۰	٦۰۰ تا ۱٤۰۰	٤۸۷ تا ٤۹۸
آنتالپی ذوب (J/gr)	دمای ذوب (°C)	دمای انتقال شیشه‌ای (°C)
۲۹۳	۱۲۵ تا ۱۳۵	-۱۰۰

جدول ۳ شرایط جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای

شرایط سطحی	سطح صاف S0	خراش با سنبهٔ ۱، S1	خراش با سنبهٔ ۲، S2
سرعت چرخشی (rpm)	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۲۵۰۰
عمق فروروی (mm)	۳/۲	۳/۲	۳/۲
نرخ فروروی (mm/min)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
زمان ماندگاری (s)	۱۵-۱۰-۵	۱۵-۱۰-۵	۱۵-۱۰-۵

برای اندازه‌گیری دما از ترموکوپل‌های نوع K در مناطق مختلف نمونه استفاده شد. بدین منظور ۳ترموکوپل در مرکز جوش، در طرف آلومینیم با فاصلهٔ ۱۲mm از مرکز جوش و در طرف پلی‌اتیلن با فاصلهٔ ۱۲mm از مرکز جوش قرار گرفت. باتوجه‌به نحوهٔ قرارگیری ورق‌ها به‌صورت لبه‌روی‌هم، ترموکوپل طرف پلی‌اتیلن و مرکز جوش از سمت پشت و ترموکوپل طرف آلومینیم از سمت رو نصب شد.

برای ارزیابی رفتار مکانیکی نمونه‌های اتصال‌داده‌شده، آزمون کشش برشی به‌صورت بهینه‌شده شرایط استاندارد DIN EN ISO ۱۴۲۷۳ انجام شد. به‌منظور آماده‌سازی نمونه‌ها برای آزمون کشش، ۲طرف ورق‌هایی با ابعاد ۱۰۰×۵۰mm لقمه‌هایی با ضخامت ۲mm چسبانده شد تا قسمت‌هایی که در داخل فک دستگاه قرار می‌گیرند، مانند قسمت هم‌پوشانی ضخامت ٤mm داشته باشد. نرخ حرکت فک‌های دستگاه ۰/۵mm/min انتخاب و از هر حالت برای کاهش خطای آزمایش ۳نمونه کشیده شد. میانگین حداکثر نیروی شکست این ۳نمونه به‌عنوان نیروی کشش برشی گزارش شد. همچنین برای تهیه نمونه‌های متالوگرافی، نمونه‌های جوش‌داده‌شده با استفاده از دستگاه برش با آب (Waterjet) در اندازه‌های معین برش داده شدند. مزیت استفاده از این روش انجام فرایند برشکاری به‌صورت سرد و ایجادنشدن تنش حرارتی در ماده است. سپس نمونه‌ها مانت سرد شدند و با استفاده از سنباده و نمد آغشته به ذرات آلومینای ۰/۰۵ µm صیقل‌کاری شدند. بررسی فصل مشترک اتصال با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) انجام شد.

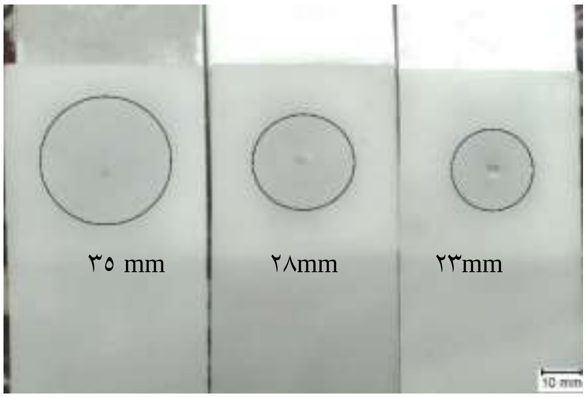
نتایج و بحث

سطح مقطع اتصال

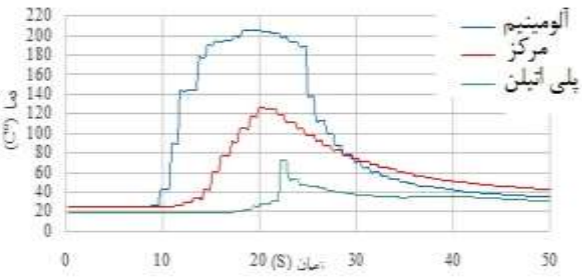
در مرحلهٔ ابتدایی این پژوهش تلاش شد با قراردادن پلی‌اتیلن بر روی آلومینیم جوشکاری انجام شود، اما باتوجه‌به پایین‌بودن ضریب هدایت حرارتی پلی‌اتیلن، گرمای لازم از طریق ضخامت ورق نتوانست به آلومینیم منتقل و باعث نرم‌شدن آن شود. درنتیجه اتصالی بین ورق‌های آلومینیم و پلی‌اتیلن حاصل نشد. ازاین‌رو، برای انجام جوشکاری، آلومینیم روی پلی‌اتیلن گذاشته شد و فرایند جوشکاری انجام شد. در این حالت به‌دلیل بالابودن ضریب هدایت حرارتی آلومینیم، گرما از طریق ضخامت ورق به پلی‌اتیلن منتقل و موجب ذوب سطحی آن شد. با پایان‌یافتن فرایند جوشکاری و بیرون‌آمدن ابزار، مذاب پلی‌اتیلنی که با آلومینیم در تماس است (پدیده ترشوندگی)، تحت فشار گیره‌های نگهدارنده در دمای محیط منجمد و به‌این‌ترتیب بین ورق‌ها اتصال ایجاد می‌شود. در شکل ۱ به‌عنوان نمونه نمای پشت جوش‌های با سطح صاف نشان داده شده است که سطح ترشوندگی آلومینیم به‌وسیلهٔ مذاب پلی‌اتیلن به‌شکل‌های یک دایره با قطرهای مختلف است. مقایسهٔ سطح ترشوندگی در شرایط سطحی و زمان‌های مختلف نشان داد که با تغییر شرایط سطحی میزان ترشوندگی به‌صورت چشمگیری تغییر نمی‌کند. با طولانی‌ترشدن زمان ماندگاری، سطح ترشوندگی آلومینیم به‌وسیلهٔ مذاب پلی‌اتیلن افزایش می‌یابد که دلیل آن ایجاد گرمای اصطکاکی بیشتر و درنهایت تولید حجم مذاب بالاتر در زمان‌های طولانی‌تر است. دماهای اندازه‌گیری‌شده در طول فرایند نیز این قضیه را نشان می‌دهد که با تغییر شرایط سطحی تغییرات دمایی چشمگیری به‌وجود نیامد. با اختلافی حدود ۳ تا ٤ درجه سانتی‌گراد، دماهای به‌دست‌آمده از نمونه‌ها باهم قابل مقایسه است. با ازدیاد زمان ماندگاری، دما نیز افزایش یافت. از آن‌جایی که ضریب هدایت حرارتی آلومینیم در مقایسه با پلی‌اتیلن خیلی بیشتر است، دما در طرف آلومینیم بیشتر افزایش پیدا می‌کند.

درتماس‌بودن آلومینیم با پلی‌اتیلن و انتقال حرارت از طریق آن نیز باعث افزایش دمای پلی‌اتیلن می‌شود.

در زمان‌های زیاد، حجم مذاب پلیمر بیشتر با دماهای بالاتری ایجاد می‌شود و چسبندگی پلیمر به فلز افزایش می‌یابد. حداکثر دمای اندازه‌گیری‌شده در فرایند، مربوط به نمونه‌هایی بود که در بیشترین زمان ماندگاری (۱۵ثانیه) قرار گرفتند که نمودار آن در شکل ۲ آمده است.



شکل ۱ مقایسهٔ سطح ترشوندگی آلومینیم به‌وسیلهٔ مذاب پلی‌اتیلن در شرایط سطحی یکسان صاف با زمان‌های (الف) ۵ثانیه، (ب) ۱۰ثانیه و (ج) ۱۵ثانیه



شکل ۲ نمودار دماهای اندازه‌گیری‌شده در فرایند در زمان ۱۵ثانیه

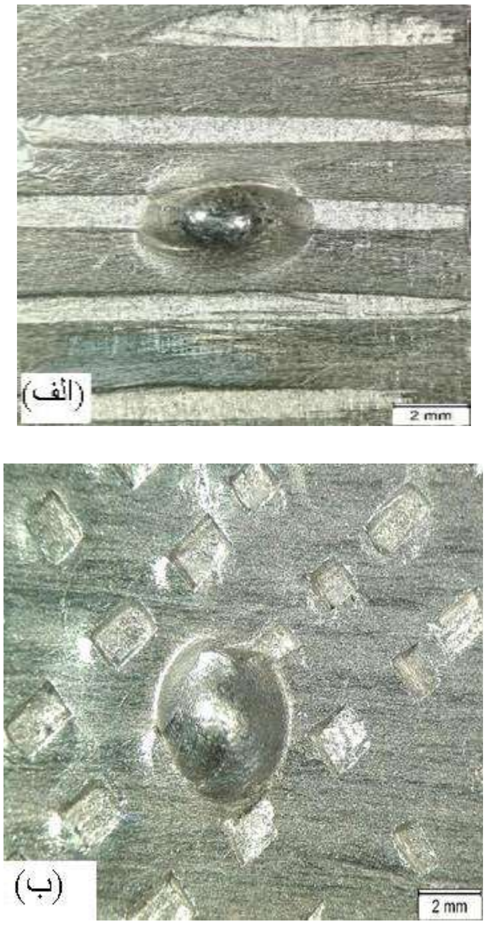
مکانیزم‌های اتصال

عموماً در اتصال فلز–پلیمر به‌روش FSSW، مکانیزم اتصال چسبندگی و ترشوندگی سطح فلز به‌وسیلهٔ مذاب پلیمر و همچنین قفل‌شدگی مکانیکی است [11,12]. البته ممکن است لایه‌ای واکنشی در بین پلیمر و فلز که اتم‌های هر ۲ماده در آن حضور داشته باشد نیز به‌وجود آید [10] یا تجزیه پلیمر در نزدیکی سطح اتصال رخ دهد [13]. در این پژوهش، درباره اتصال آلومینیم به پلی‌اتیلن گرمای اصطکاکی تولیدشده در فصل مشترک ابزار چرخشی و سطح آلومینیم از طریق ضخامت ورق به پلی‌اتیلن منتقل می‌شود و باعث ذوب موضعی آن در اطراف منطقه تماس ابزار و مناطق در تماس با سطح آلومینیم می‌شود. همان‌طور که پلی‌اتیلن ذوب می‌شود، برآمدگی در سطح پایین آلومینیم به‌شکل پین ابزار شکل می‌گیرد و با منجمدشدن پلی‌اتیلن اطراف این آلومینیم تغییرشکل‌یافته، قفل مکانیکی ایجاد می‌شود [11]. ایجاد قفل مکانیکی در فصل مشترک اتصال توسط پاتل و همکارانش [14] نیز گزارش شده است. همچنین خراش‌های ایجادشده سنبه‌ها بر روی سطح آلومینیم نیز به‌عنوان قفل مکانیکی عمل می‌کند و مذاب پلی‌اتیلن در این محل‌ها می‌تواند به دام بیفتد و منجمد شود. درواقع یک حالت نر و مادگی بین آلومینیم و پلی‌اتیلن ایجاد می‌شود و به‌این‌ترتیب ۲ماده به یکدیگر متصل می‌شوند. بنابراین، مکانیزم اتصال شامل ترشوندگی سطح آلومینیم به‌وسیلهٔ مذاب پلی‌اتیلن و تشکیل مراکز قفل مکانیکی به‌وسیلهٔ ابزار و سنبه‌هاست. شکل ۳ تصاویر برآمدگی و خراش‌های ایجادشدهٔ سنبه‌ها به‌عنوان قفل مکانیکی بر روی آلومینیم و همچنین اثر آن‌ها بر روی پلی‌اتیلن بعد از منجمدشدن را نشان می‌دهد.

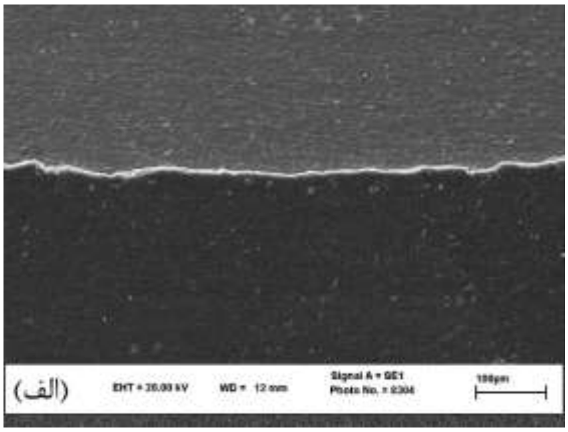
سنبهٔ ۲ خراش‌های بیشتر با اندازه‌های کوچک‌تر به‌صورت نقطه‌ای و سنبهٔ ۱ خراش‌های کمتر با اندازه‌های بزرگ‌تر به‌صورت طولی در جهت عرض ورق ایجاد می‌کند. ایجاد قفل مکانیکی همراه با چسبندگی مناسب نقش مهمی در افزایش استحکام اتصالات هیبریدی فلز–پلیمر دارد [15].

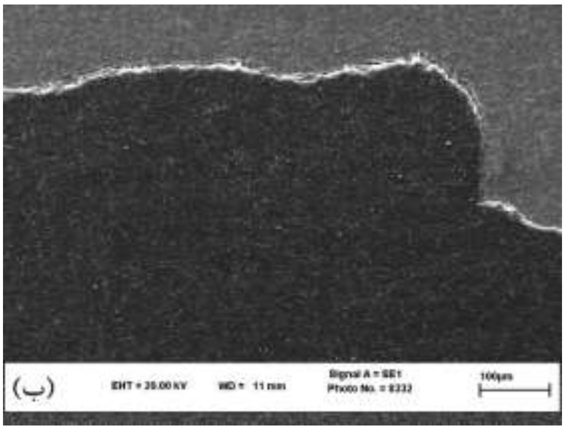
تصاویر SEM گرفته‌شده از نمونه‌ها، چسبندگی مطلوب در فصل مشترک آلومینیم و پلی‌اتیلن را نشان می‌دهد (شکل ٤–الف). یکی از مشکلات جوشکاری فلزات و پلیمرها تفاوت زیاد در ضریب انبساط حرارتی آن‌هاست که سبب ایجاد شکاف در فصل مشترک بین مواد می‌شود. در این پژوهش، با منجمدشدن پلی‌اتیلن در دمای محیط، فشار گیره‌های نگهدارنده مانع از جدایش پلی‌اتیلن از سطح آلومینیم و ایجاد شکاف بین آن‌ها شد؛ درنتیجه اختلاف ضریب انبساط حرارتی مواد به‌صورت تنش‌های حرارتی در ماده باقی ماند. تصاویر SEM به‌دست‌آمده از نمونه‌هایی که با سنبه بر روی آن‌ها خراش ایجاد شده است نیز نشان می‌دهد که مذاب پلی‌اتیلن به‌صورت کامل خراش‌ها را پر کرده است و چسبندگی مطلوبی با دیواره‌های آلومینیمی آن دارد که این خراش‌ها به‌عنوان مراکز قفل مکانیکی عمل می‌کنند (شکل ٤–ب). بنابراین، با وجود مشاهدهٔ نواحی کوچک عدم اتصال، بازهم استحکام و نیروی تحمل‌پذیر این نمونه‌ها بیشتر از

نمونهٔ با سطح صاف بود.



شکل ۳ برآمدگی ناشی از آلومینیم تغییرشکل‌یافته به‌وسیلهٔ ابزار و خراش‌های ایجادشده به‌وسیلهٔ: الف) سنبهٔ ۱، ب) سنبهٔ ۲



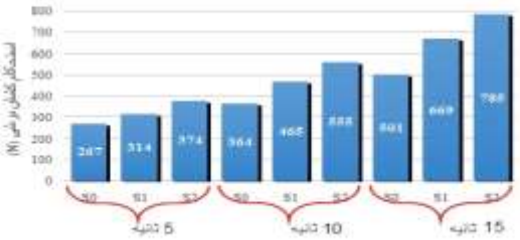


شکل ٤ (الف) تصویر SEM از سطح مقطع اتصال: الف) نمونهٔ جوشکاری‌شده با سطح صاف، ب) نمونهٔ جوشکاری‌شده با سنبهٔ شماره ۲

نتایج آزمون کشش برشی

شکل ۵ میانگین نیروی کشش برشی نمونه‌ها در شرایط مختلف را نشان می‌دهد. مقایسهٔ نتایج مربوط به نمونه‌های تحت شرایط سطحی مختلف، اثر مثبت ایجاد خراش بر روی آلومینیم به‌وسیلهٔ سنبه‌ها را تأیید می‌کند، زیرا سبب افزایش استحکام شده است. سنبهٔ ۲ در مقایسه با سنبهٔ ۱ استحکام را به مقدار بیشتری افزایش داد، زیرا خراش‌های بیشتر با اندازه‌های کوچک‌تر به‌صورت نقطه‌ای ایجاد کرد.

سنبهٔ ۱ نیز با ایجاد خراش‌های کمتر با اندازه‌های بزرگ‌تر به‌صورت طولی، استحکام بالاتری نسبت به سطح صاف از خود نشان داد. بنابراین، در یک زمان ثابت استفاده از سنبهٔ ۲ برای ایجاد خراش توصیه می‌شود. مقایسهٔ استحکام نمونه‌ها در شرایط سطحی یکسان با زمان‌های مختلف نیز نشان می‌دهد که با زیادشدن زمان ماندگاری، استحکام نیز افزایش می‌یابد. علت افزایش سطح ترشوندگی فلز به‌وسیلهٔ مذاب پلیمر به‌دلیل افزایش گرمای اصطکاکی ایجادشده است. ضمن اینکه زمان‌های طولانی‌تر، مذاب با دمای بالاتری ایجاد می‌کند و چسبندگی محکم‌تری بین مواد تشکیل می‌دهد. کیمورا و همکارانش [16] نیز نشان داده‌اند که عملیات سطحی می‌تواند استحکام اتصالات فلز–پلیمر را بهبود بخشد.



شکل ۵ میانگین استحکام کشش برشی نمونه‌های جوشکاری‌شده در شرایط مختلف (S0: سطح صاف، S1: خراش ایجادشده با سنبهٔ ۱ و S2: خراش ایجادشده با سنبهٔ ۲)

نکته شایان توجه این است که نمونهٔ ۱۰–S0 در مقایسه با نمونهٔ ۵–S1 نیروی بیشتری و در مقایسه با نمونهٔ ۵–S2 نیروی کمتری را تحمل کرده است. به‌نظر می‌رسد افزایش سطح ترشوندگی و ایجاد مذاب با دمای بالاتر بر قفل مکانیکی ایجادشده به‌وسیلهٔ سنبهٔ ۱ غلبه کرده و باعث افزایش استحکام شده است، زیرا چنین شرایطی در نمونهٔ ۱۵–S0 نیز مشاهده می‌شود که نسبت به نمونهٔ ۱۰–S1 تحت نیروی بیشتر اما نسبت به نمونهٔ ۱۰–S2 بر اثر نیروی کمتری شکسته است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای برای اتصال ورق‌های آلومینیم و پلی‌اتیلن استفاده شد و با ارزیابی خواص مکانیکی و فصل مشترک اتصالات، نتایج زیر به‌دست آمد:

۱. مکانیزم‌های اصلی اتصال در این روش، ایجاد قفل مکانیکی بین ورق‌ها به‌وسیلهٔ ابزار و سنبه‌ها و نیز چسبندگی مذاب پلی‌اتیلن به سطح آلومینیم است؛

۲. با افزایش زمان ماندگاری به‌دلیل ایجاد گرمای اصطکاکی بیشتر، مذاب پلی‌اتیلن زیادتر و با دمای بالاتری ایجاد شد و به‌تبع آن ترشوندگی و چسبندگی سطح آلومینیم افزایش یافت؛

۳. استفاده از سنبه‌ها بای ایجاد خراش موجب افزایش استحکام شد. سنبهٔ ۲ در مقایسه با سنبهٔ ۱ به‌دلیل ایجاد خراش‌های بیشتر با اندازه‌های کوچک‌تر، نیروی شکست را به میزان بیشتری افزایش داد. بیشترین مقدار نیرو برابر N ۷۸۵ در ۱۵ثانیه با خراش ایجادشده به‌وسیلهٔ سنبهٔ ۲ به‌دست آمد؛

٤. تصاویر SEM گرفته‌شده از نمونه‌ها، چسبندگی مطلوبی را در سراسر منطقهٔ اتصال و در داخل خراش‌های ایجادشده نشان داد.

مراجع

1. Liu, Y., Zhuang W., "Self-piercing riveted-bonded hybrid joining of carbon fibre reinforced polymers and aluminium alloy sheets", *Thin-Walled Structures*, Vol. 144, Article 106340, (2019).

2. Khodabakhshi, F., Haghshenas, M., Sahraeinejad, S., Chen, J., Shalchi, B., Li, J., and Gerlich, A. P., "Microstructure-property characterization of a friction-stir welded joint between AA5059 aluminum alloy and high density polyethylene", *Materials Characterization*, Vol. 98, pp. 73-82, (2014).

3. Abibe, A. B., Sônego, M., Dos Santos, J. F., Canto, L. B., and Amancio-Filho, S. T., "On the feasibility of a friction-based staking joining method for polymer–metal hybrid structures", *Materials & Design*, Vol. 92, pp. 632-642, (2016).

4. Goushegir, S. M., Dos Santos, J. F., and Amancio-Filho, S. T., "Friction spot joining of aluminum AA2024/carbon-fiber reinforced poly (phenylene sulfide) composite single lap joints: microstructure and mechanical performance", *Materials & Design*, Vol. 54, pp. 196-206, (2014).

5. Mishra, R. S., Mahoney, M. W., Sato, Y., Hovanski, Y., and Verma, R., "Friction Stir Welding and Processing VII", John Wiley & Sons, NJ, (2013).
6. Pan, T. Y., "Friction Stir Spot Welding (FSSW)-A Literature Review (No. 2007-01-1702)", SAE Technical Paper, Pennsylvania, (2007).
7. Yuan, W., "Friction stir spot welding of aluminum alloys”, Missouri University of Science and Technology Pub., Missouri, (2008).
8. Esteves, J. V., Goushegir, S. M., Dos Santos, J. F., Canto, L. B., Hage, E., and Amancio-Filho, S. T., "Friction spot joining of aluminum AA6181-T4 and carbon fiber-reinforced poly (phenylene sulfide): effects of process parameters on the microstructure and mechanical strength", *Materials & Design*, Vol. 66, pp. 437-445, (2015).
9. Pabandi, H. K., Movahedi, M., and Kokabi, A. H., "new refill friction spot welding process for aluminum/polymer composite hybrid structures", *Composite Structures*, Vol. 174, pp. 59-69, (2017).
10. Balakrishnan, K. N., Kang, H. T., and Mallick, P. K., "Joining aluminum to nylon using frictional heat (No. 2007-01-1701)", SAE Technical Paper, Pennsylvania, (2007).
11. Yusof, F., Miyashita, Y., Seo, N., Mutoh, Y., and Moshwan, R., "Utilising friction spot joining for dissimilar joint between aluminium alloy (A5052) and polyethylene terephthalate", *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 17(7), pp. 544-549, (2012).
12. ASM International, ASM International. Handbook Committee, & ASM International. Alloy Phase Diagram Committee, "Metals Handbook: Properties and selection-Vol. 2", ASM International, Ohio, (1990).
13. Kadoya, S., Kimura, F., and Kajihara, Y., "PBT–anodized aluminum alloy direct joining: Characteristic injection speed dependence of injected polymer replicated into nanostructures", *Polymer Testing*, Vol. 75, pp. 127-132, (2019).
14. Patel, A. R., Kotadiya, D. J., Kapopara, J. M., Dlawadi, C. G., Patel, N. P., and Rana, H. G., "Investigation of Mechanical Properties for Hybrid Joint of Aluminium to Polymer using Friction Stir Welding (FSW)", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, pp. 4242-4249, (2018).
15. Meng, X., Huang, Y., Xie, Y., Li, J., Guan, M., Wan, L., Dong, Z., Cao, J., "Friction self-riveting welding between polymer matrix composites and metals", *Composites Part A*, Vol. 127, Article 105624, (2019).
16. Kimura, F., Yamaguchi, E., Hurie, N., Suzuki, G., and Kajihara, Y., "Formation of boehmite crystals on microblasted aluminum surface to enhance performance of metal–polymer direct joining", Materials Letters, Article 126963, (2019).